**УДК 620.18**

**Анализ микроструктуры образца, полученного методом селективного лазерного спекания**

**А. А. Бобров, А.Ю. Усачёва, А.В. Побелянский**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Инновации сегодня становятся жизненно необходимыми для выживания машиностроительных предприятий и компаний. Одним из путей снижения стоимости конструирования сложных инновационных изделий является применение новых революционных технологий, способных коренным образом улучшить качественные показатели выпускаемых изделий и условия производства. К приоритетным технологиям относятся технологии непосредственного получения трехмерных объектов на основе математической модели изделия. Данные технологии получили название аддитивные. Развитие данных технологий в большей степени предопределяют воплощение четвёртой промышленной революции «Индустрия 4.0».

Проектирование деталей и узлов с  меньшей массой при сохранении их функциональности и  физико-механических свойств является одной из  основных задач, решаемых в  аэрокосмической промышленности. Современное программное обеспечение позволяет оптимизировать геометрию детали, что приводит к  эффективному сокращению ее массы. Однако, создание изделий сложной геометрии требует больших трудозатрат и материальных вложений, из-за чего использовать методы оптимизации в  традиционном производстве иногда нецелесообразно. Технологии аддитивного производства позволяет получить сложную конструкцию без увеличения стоимости её производства. При этом производство изделий, спроектированных для изготовления по  "традиционной" технологии, снижает эффективность применения аддитивных методов из-за завышенного использования материала. Таким образом, оптимизированные детали не  только улучшают характеристики деталей, но  и  повышают производительность аддитивной технологии.

Аддитивное производство (англ. – additive manufacturing) представляет собой класс технологий изготовления деталей сложной формы по трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала.

Процессы, используемые в аддитивном производстве, определяются состоянием применяемых материалов:

– жидкое (полимеры) – стереолитография, послойная наплавка, струйная печать;

– порошкообразное (полимеры, керамика) – 3d-печать, селективное лазерное спекание, селективная лазерная плавка;

– порошкообразное (металлы) – прямое лазерное спекание металлов, электроннолучевая плавка, прямое нанесение металлов, точное лазерное формование;

– твердое (полимеры, металлы, керамика, композиционные материалы)

– послойное изготовление объектов из листового материала (листы), произвольное экструзионное формование (проволока).

Указанные технологические процессы к настоящему времени освоены рядом зарубежных компаний. Так, компания Boeing в последние годы изготавливает более 22 тыс. деталей 300 наименований для 10 типов военных и коммерческих летательных аппаратов, включая Dreamliner, а по заявлению представителя компании General Electric через 10 лет примерно половина изготавливаемых ими деталей будет получена с помощью аддитивных технологий.

Фирма Rolls-Royce [6] уже проводит летные испытания двигателя Trent XWB с изготовленным с помощью аддитивных технологий крупногабаритным титановым корпусом передней опоры. Выстроен целый завод, на котором уже налажен промышленный процесс выращивания лопаток из интерметаллида титана для турбин низкого давления. Фактически реализован полный производственный цикл: начиная от получения порошка и заканчивая лабораторными исследованиями продукции. Размер выращиваемых лопаток с бандажными полками — до 325 мм  
высотой, это колоссальный выигрыш и в массе, и в скорости изготовления, и в расходе материала.

Данные лопатки предназначены для использования на сертифицированных двигателях семейства LEAP фирмы CFMI. Перед этим в компании в течение семи лет проводились исследования и квалификация материала, производства, деталей: испытывались образцы, которые были выращены вертикально, горизонтально, под углом 45°, чтобы добиться такого технологического процесса, когда разница в свойствах в различных направлениях не превышала бы допустимой величины.

Фирма MTU Aero Engines на сегодняшний день имеет оборудование для изготовления деталей из металлических порошков сплавов Inconel 718, MAR-M-509, Steels и New Superalloys. Для двигателя A320neo внедряется в серийное производство изготовление бароскопов методами аддитивных технологий.

Ожидается, что компания GE Aviation будет ежегодно печатать 40 тыс. форсунок. А компания Airbus к 2018 г. собирается печатать до 30 т деталей ежемесячно. Компания отмечает значительный прогресс в характеристиках произведённых таким способом деталей по сравнению с традиционным. Оказалось, что кронштейн, который был рассчитан на 2,3 т нагрузки, в действительности может выдерживать нагрузку до 14 т при снижении его веса вдвое. В самолётах Airbus насчитывается 60 тыс. частей, напечатанных на 3D-принтерах Fortus компании Stratasys. Другие компании авиакосмической индустрии также используют технологии аддитивного производства. Среди них: Bell Helicopter, BAE Systems, Bombardier, Boeing, Embraer, Honeywell Aerospace, General Dynamics, Northrop Grumman, Lockheed Martin, Raytheon, Pratt & Whitney, Rolls-Royce и SpaceX.

Американские аналитики прогнозируют, что в 2021 году объем мирового аддитивного производства составит около 10,8 млрд долларов.

Уникальные возможности аддитивного производства обеспечивают не только повышение коэффициента использования материалов и высокую точность размеров изготавливаемых изделий без их механической обработки, но и следующие основные преимущества:

– переход от массового производства к массовой кастомизации (возможность удовлетворения как можно большего числа индивидуальных заказчиков), увеличение номенклатуры изделий;

– возможность создания изделий со сложной формой или даже невозможной в обычном производстве конфигурацией;

– сокращение производственных издержек: себестоимости при малых партиях, затрат на электроэнергию, уменьшение размеров производственных площадей за счет исключения ряда технологических операций;

– существенное сокращение длительности производственного цикла, сроков и стоимости запуска изделия в производство благодаря отсутствию необходимости в специализированной инструментальной оснастке;

– резкое повышение гибкости производства, отсутствие необходимости переналадки оборудования под новое изделие;

– упрощение логистики и уменьшение объемов складских запасов;

– персонализация дизайна изделий.

Основными направлениями развития аддитивных технологий в России являются:

– создание исходных материалов и оборудования для их производства;

– разработка комплексных технологий аддитивного производства изделий;

– формирование сети центров коллективного пользования, в том числе для проведения испытаний, сертификации и стандартизации материалов и изделий аддитивного производства.

Работы по освоению аддитивных технологий активно развиваются организациями и предприятиями Минпромторга России, Минобрнауки России, Роскосмоса, Государственной корпорации «Ростех», Госкорпорации «Росатом», ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», научными организациями ФАНО России.

ФГУП «ВИАМ» создан научно-производственный технологический комплекс с замкнутым циклом аддитивного производства деталей для авиационных двигателей, включающий изготовление расходуемой шихтовой заготовки, мелкодисперсных металлических порошков различных сплавов и разработку технологий селективного лазерного спекания деталей из этих порошков с последующей газостатической обработкой. Среди его основных заказчиков ОАО «Авиадвигатель» и ОАО «НПО «Сатурн».

ОАО «Национальный институт авиационных технологий» разработано несколько типов экспериментальных лазерных установок послойного синтеза, освоены технологии производства сложнопрофильных деталей из закупаемых в Германии металлических, полимерных и керамических порошков для авиационной техники как на установках собственной разработки, так и на оборудовании, приобретенном за рубежом. Кроме того, в этой организации созданы технологические комплексы аддитивного производства изделий из композитных материалов, песчаных форм и стержней, литейных моделей и оболочковых керамических форм. ОАО «НИАТ» поставляет свои изделия ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова», ОАО «Климов», ОАО «ЦКБ морской техники «Рубин», ОАО «МПП имени В.В. Чернышева», ОАО «Кузнецов», ОАО «Энергомаш».

ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» осуществляет работы по внедрению технологий послойного синтеза сложнопрофильных и крупногабаритных деталей из металлических порошковых композиций, а также по выращиванию полимерных моделей для фасонного литья в оболочковые формы. Это предприятие работает в интересах ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Климов», ОАО «Композит». ОАО «Композит» в рамках выполнения заданий Роскосмоса проведены исследования по получению методами центробежного распыления порошков заданного фракционного состава из различных сплавов на основе никеля и титана.

Фундаментальные и поисковые научные исследования в области развития технологий послойного синтеза выполняются ИФХЭ РАН, Институтом металлоорганической химии имени Г.А. Разуваева РАН, Самарским филиалом Физического института имени П.Н. Лебедева РАН, Институтом теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, а также Московским государственным технологическим университетом «СТАНКИН», Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, Национальным исследовательским Томским государственным университетом, Национальным исследовательским ядерным университетом «МИФИ», Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики и другими научными организациями, Балтийским государственным техническим университетом «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.

В данной работе производится анализ микроструктуры образца, полученного на промышленном 3D принтере Concept Laser M2, использующего аддитивную технологию LaserCUSING лазерного плавления металлических порошков. Область построения 250х250х280, лазер мощностью 200 Вт. Открытая архитектура модуля настроек материалов для 3D печати данного принтера позволила использовать металлические порошок отечественного производства марки ПР-07Х18Н12М2, фракция 0 – 40 мкм, производство АО «ПОЛЕМА».

Для проведения исследований был использован цилиндр 15x45 мм, который был выращен под углом 45°. Данные исследования были проведены совместно ЦКП «АТОС» БГТУ «ВОЕНМЕХ» и АО «ЛОМО».

В процессе подготовки образцы зажимаются в тиски, шлифуются и полируются торцевые поверхности, любые дефекты, трещины, забоины, являющиеся концентраторами напряжений, не допускаются.

Металлографические исследования проводили методами световой микроскопии с использованием металлографического микроскопа «ЛОМО», оснащённого цифровой камерой.

При визуальном осмотре образца (рисунок 1), выращенного в вертикальном направлении, при небольшом увеличении видны чередующиеся полосы, возможно, это связанно с дендритным ростом кристаллов, при этом данный полосчатый контраст объединен в пакеты, расположенные под углом друг к другу. Такое расположение пакетов, по-видимому, связано с направлением движения лазерного луча. При большем увеличении можно разглядеть столбчатые кристаллы в начальной стадии дендритного ветвления.

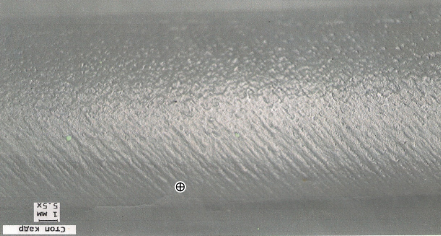
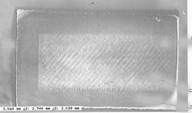


Рисунок 1 – Внешний вид образца при увеличении 5,5x

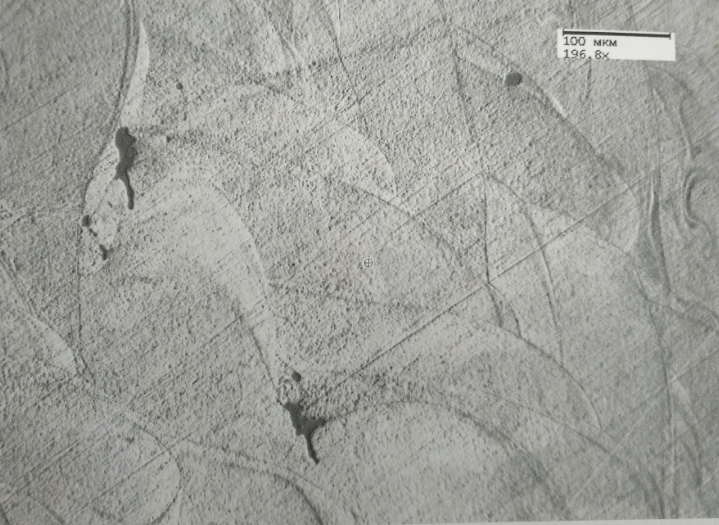
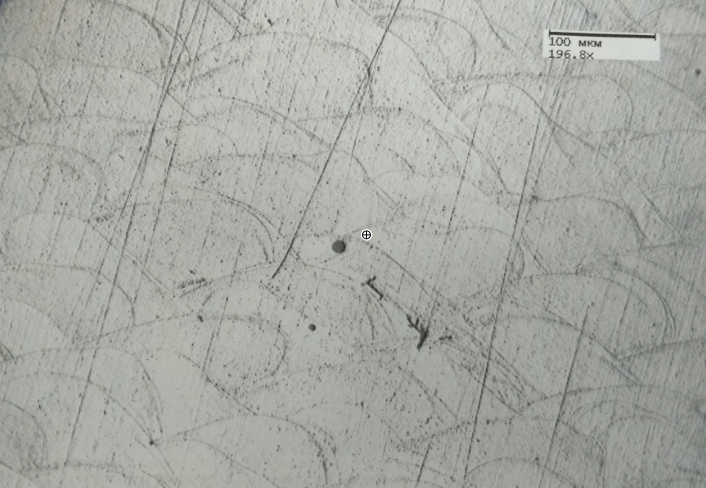
При лазерном воздействии на поверхности порошка образуется ванна расплава, которая перемещается параллельно с пучком лазера. Границы отдельных ванн расплава хорошо просматриваются в структуре материалов как в поперечном, так и в продольном сечениях. В структуре хорошо видны отдельные ванны расплава. В поперечном сечении ванны расплава имеют форму дугообразных сегментов, формирующих слоистую структуру объекта, однако из рисунка видно, что размеры отдельных ванн существенно различны. В продольном сечении ванны расплава имеют форму эллипсов, которые образуют ряды (треки) в двух взаимно перпендикулярных направлениях: это направления движения лазера при синтезе двух следующих друг за другом по высоте слоев.

На рисунках 2, 3 просматривается ликвация металла, на периферии образца прослеживается более мелкая зернистость, в сердцевине – более крупная. Микроструктурная неоднородность оказывает отрицательное влияние на механические и функциональные свойства детали и включает в себя: непостоянный размер зерна, наличие примесей.

** **

а б

Рисунок 2 - Микрошлифы образца в увеличении 5.5x: а) поперечный; б) продольный.

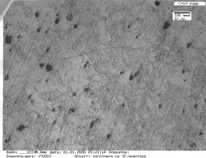
а б

Рисунок 3 – Продольный микрошлиф при увеличении 200x: а) сердцевина; б) периферия.

Микроструктурная неоднородность во многом определена процессами, связанными с взаимодействием пятна лазерного излучения с порошковым материалом. Исследование влияния различных порошковых композиций было представлено в различных работах [3,4,5]. Большинство работ посвящено исследованию влияния передаваемой на обрабатываемый материал плотности энергии лазерного излучения, определяемой такими параметрами, как мощность лазера, скорость сканирования и шаг сканирования. Данные работы показали корреляцию между плотностью энергии лазерного луча и плотностью синтезируемого материала, что позволило определить оптимальные режимы обработки.

В нетравленом состоянии на снимке на светлом поле металлической основы (рисунок 3а) можно увидеть раковины, твердые и мягкие неметаллические включения, расслоения. После травления (рисунок 3б) выявляется структура металлической основы, наблюдаются различные дефекты.

На рисунке 4 просматривается пористость, которая свидетельствует неполному спеканию порошка. Не полностью расплавленные частицы являются источниками пониженной прочности материала, оказывает наибольшее влияние на усталостные характеристики материала и является источником развития трещин в образце из-за отсутствия механической связи между синтезируемыми слоями детали.

** **

а б

Рисунок 4 – микрошлиф в увеличении 100x: а) без травления, б) с травлением.

Для устранения дефектов была проведена термическая обработка, аустенизация. На снимке микроструктуры после обработки (рисунок 5), видно, что избавиться полностью от дефектов, указанных ранее, не удалось.

Рисунок 5 – микрошлиф после термической обработки

Формируемая в результате СЛС структура образца обладает повышенной твердостью: она составляет 223 HB на периферии, в сердцевине – 217 HB. Также был определен химический состав образца: содержание хрома 16,9-17,2% (по массе), содержание никеля 10,8-11,2% (по массе), содержание молибдена 2,1-2,3% (по массе), содержание марганца 1,3% (по массе), содержание кремния 0,4% (по массе), содержание меди 0,4% (по массе), содержание вольфрама 0,3% (по массе), содержание титана 0,09% (по массе), содержание фосфора 0,01% (по массе), содержание серы 0,01% (по массе), содержание железа – остальное.

По результатам металлографических исследований было установлено, что структура исходных образцов представляет собой дендритные зерна, состоящие из столбчатых кристаллов. В ходе выполнения работы было выявлено, что в образце присутствуют раковины, микроструктурная неоднородность, расслоения. На процесс изготовления деталей методом СЛС влияет множество факторов. Некоторые из них определяются основными свойствами порошковых композиций. К управляющим факторам можно отнести технологические режимы процесса СЛС, скорость сканирования, мощность лазерного излучения, шаг сканирования, тип штриховки лазерным лучом, которые и подбираются для получения качественных деталей.

**Библиографический список**

1. Рудской А.И. Аддитивные технологии: учебное пособие / А.И. Рудской, А.А. Попович, А.В. Григорьев, Д.Е. Каледина. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016.

2. Сотов А.В. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук «Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления жаровых труб ГТД методом селективного лазерного сплавления». – 2018. С. 111-125.

3. Huang, Q. Microstructure and inclusion of Ti–6Al–4V fabricated by selective laser melting / Q. Huang, N. Hu, X. Yang, R. Zhang, Q. Feng // Frontiers Mater. Sci. – 2016. – V. 10 (4). – P. 428 – 431.

4. Popovich, V.A. Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties / V.A. Popovich, E.V. Borisov, A.A. Popovich, V.Sh. Sufiiarov, D.V. Masaylo, L. Alzina // Materials & Design. – 2017. – V. 114. – P. 441 – 449.

5. Arisoy, Y.M. Influence of scan strategy and process parameters on microstructure and its optimization in additively manufactured nickel alloy 625 via laser powder bed fusion / Y.M. Arisoy, L.E. Criales, T. Özel, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – 2017. – V. 90. – P. 1393 – 14.

6. Rolls-Royce breaks additive record with printed Trent-XWB bearing  
[Электронный ресурс]. - <https://www.theengineer.co.uk/issues/june-2015-digiissue/rolls-royce-breaks-additive-record-with-printed-trent-xwb-bearing>.